

4상 SRM의 토크 특성개선을 위한 컨버터

Huijun Wang·박태흡·김태형·이동희·안진우
경성대학교

A novel Active Converter of 4-phase SRM for Torque Characteristic Improving

Huijun Wang, Tae-Hub Park, Tae-Hyoung Kim, Dong-Hee Lee, Jin-Woo Ahn
Kyungsung University

ABSTRACT

As generally recognized, the driving performance of a SRM at higher speed will be degraded due to the effects of back electromagnetic force (EMF). This phenomenon can be improved via voltage boosting. So in this paper an improved converter of enhancing the performance for four-phase switched reluctance motor (SRM) is proposed. By using one additional capacitor and switches, an extra controllable boosted voltage can be produced during the rise and fall periods of a motor phase current. Then this active boosted voltage can reduce the effect of EMF on the current, particularly at high speeds. The attractive features of the proposed converter are as follows: obtaining boosted voltage to improve performance of SRM with same numbers of switch and diode as asymmetric converter, having higher control flexibility and capability of boosting voltage compared with passive boosting converters, possessing lower cost and simple control in comparison with existing active boosting converters. The performances of the proposed circuit are verified by the simulation and experiment results.

1. 서론

스위치드 릴럭턴스 전동기 (Switched Reluctance Motor, 이하 SRM)는 고효율, 고속운전, 간단한 전자기적 구조, 용이한 가변속 제어 등의 장점을 가지고 있어 가정기기 분야 및 산업 전반에 걸쳐 그 응용영역을 확대해가고 있다^[1].

SRM의 경우 각상의 인덕턴스 상승구간에서 공급되는 전류의 크기에 제곱에 비례하여 토크가 발생하므로 전류의 확립시간 및 크기가 전체 토크성능을 좌우하게 된다. 상권선에 흐르는 전류는 인덕턴스에 의해 확립시 지연이 발생하게 되고, 특히 고속 운전속도영역에서는 이러한 현상과 함께 충분한 시간이 주어지지 않으므로 지령 전류까지 추종하지 못하는 경우가 발생 할 수 있다. 이에 따라 충분한 토크를 발생시킬 수 없게 되거나 토크리플이 심화될 수 있다.

이러한 전류 확립시 지연에 대한 문제를 해결하기 위하여 높은 여자전압을 상권선에 인가하여 전류의 확립시간을 줄이는 방법에 관해 많은 연구가 이루어지고 있다^[2-4]. 이러한 부스트 컨버터는 일반적으로 감자 시 상권선에 축적된 에너지를 캐패

시터에 충전하고 이를 다음 상 여자 시 사용하게 되나, 여자시 부스트 캐패시터의 전압에 대한 제어가 어렵다는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 제거하기 위해 DC-Link 단에 직렬로 스위치를 추가하여 부스트 캐패시터에 의한 여자전압을 조절할 수 있는 능동형 부스트 컨버터가 제안되었다^[5].

본 논문에서는 부스트 캐패시터의 전압을 능동적으로 제어하여 빠른 상여자와 감자를 통한 토크특성 개선이 가능하고, 스위칭 소자의 수를 줄인 4상 SRM 구동을 위한 컨버터 구조를 제안하였다. 제안된 컨버터의 경우 기존의 부스트 컨버터에 비해 높은 제어성과 단순한 제어를 통하여 상전압을 조절하여 여자 전류를 제어할 수 있다. 제안된 컨버터는 수치해석시뮬레이션을 통하여 가능성을 시험하였으며, 4상 8/6극 SRM을 대상으로 실험을 하여 효용성을 검증하였다^[6].

2. 제안된 컨버터

그림 1은 본 논문에서 제안된 4상 SRM의 토크특성개선을 위한 부스트 컨버터의 구조를 나타내고 있다. 제안된 컨버터는 일반적인 비대칭 컨버터와 달리 여자시 중첩구간이 없는 A상과 C상, B상과 D상이 여자 전류의 유입에 관한 스위치를 공유하고 여자전류의 유출에 관한 스위치는 개별적으로 구성하여 제어의 효용성은 높은 구조를 취하고 있다. 또한 감자시 A상과 C상의 권선에 축적된 에너지는 D1과 Db1을 통해 부스터 캐패시터를 충전되며, B상과 D상의 경우 D2와 Db2를 통해 부스트 캐패시터를 충전하게 된다. 충전된 캐패시터는 Qd1과 Qd2에 의해 제어되어 A-C상과 B-D상에 높은 여자전압을 제어하며 인가할 수 있는 구조를 가지고 있다. 그림 2는 A상을 대상으로 제안된 4-레벨 컨버터의 4가지 동작모드를 나타내고 있다.

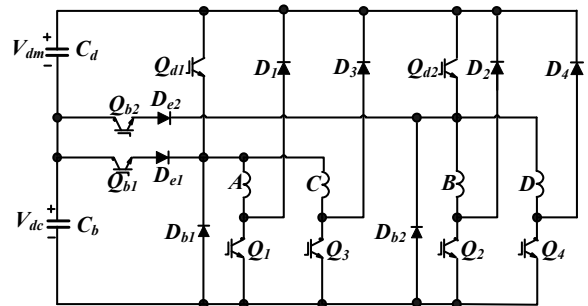


그림 1 제안된 컨버터

Figure 1. Proposed converter

(a) Mode 1 : 그림 2(a)와 같이 스위치 Q_{d1} 과 Q_1 이 턴-온되어 상권선에 부스트 캐패시터에 축적된 전압과 DC단 전압이 직렬로 인가되어 $2V_{dc}$ 만큼의 높은 전압으로 상권선을 여자 시키게 된다.

(b) Mode 2 : 그림 2(b)와 같이 스위치 Q_{b1} 과 Q_1 이 턴-온되고 스위치 Q_{d1} 턴-오프되어 DC단 전압 V_{dc} 가 상권선에 인가되어 여자된다.

(c) Mode 3 : 그림 2(c)와 같이 스위치 Q_{d1} 과 Q_{b1} 이 턴-오프되고 스위치 Q_1 은 턴-온 된 경우 권선에 축적된 에너지는 D_{b1} 을 통해 코일로 환류된다.

(d) Mode 4 : 그림 2(d)와 같이 A상에 연결된 모든 스위치 Q_{d1} , Q_{b1} , Q_1 이 모두 턴-오프된 경우 상권선에 축적된 에너지는 D_1 과 D_{b1} 을 통해 전원측과 부스트 캐패시터에 회수되어 축적되게 된다. 이때 상권선에는 $-2V_{dc}$ 만큼의 높은 감자전압이 인가되므로 상전류의 빠른 감자가 이루어지게 된다.

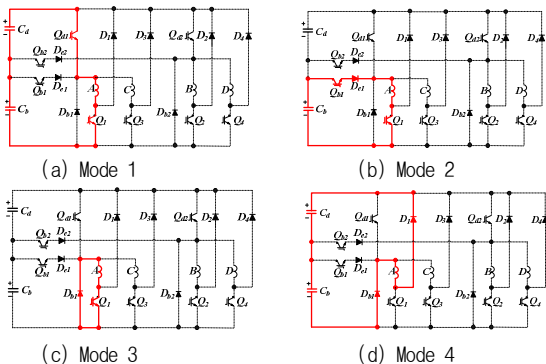


그림 2 제안된 컨버터의 동작 모드
Figure 2. Operating modes of proposed converter

제안된 컨버터는 상기와 같은 4가지 모드를 통해 높은 상전압 인가를 통한 빠른 여자, 높은 감자 전압을 통한 빠른 감자가 가능하며, 일반 여자모드와 환류모드를 통하여 튼튼한 제어성을 동시에 가지고 있음을 알 수 있다.

3. 시뮬레이션 실험 결과

3.1. 시뮬레이션 결과

제안된 컨버터의 가능성을 확인하기 위하여 수치해석을 통한 시뮬레이션을 수행하였으며, 제어 시스템의 구성은 그림 3과 같다. 그림 4는 1000[rpm] 구동 시 제안된 컨버터와 일반적인 비대칭 컨버터의 성능을 비교한 결과이며, 그림 5는 4000[rpm] 구동 시 결과를 비교한 것이다.

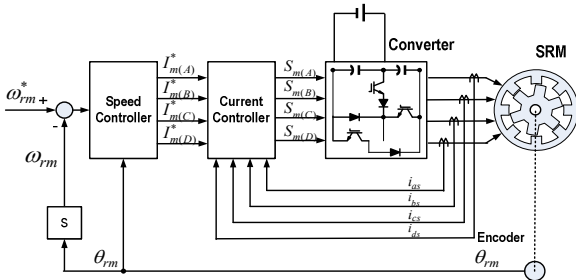
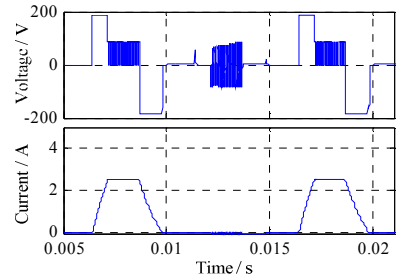
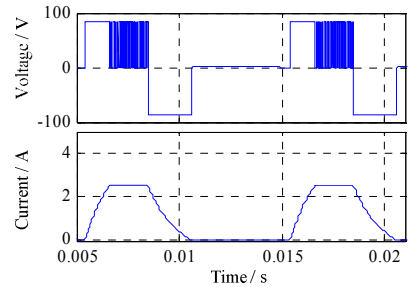


그림 3 제안된 컨버터의 제어 블록 다이어그램
Figure 3. Control block diagram



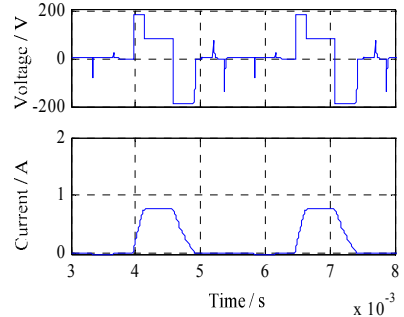
(a) Proposed converter with 100V boosting voltage



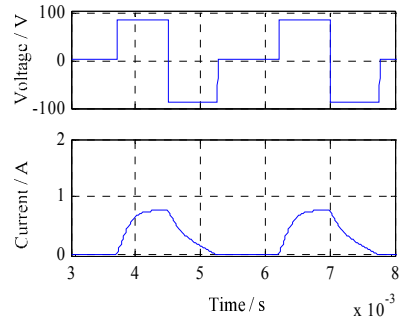
(b) Asymmetric converter

그림 4 PWM 컨트롤 모드에서의 결과 비교(1,000[rpm])
Figure 4. Compared results in PWM control mode(1,000[rpm])

그림 4는 1000rpm에서 같은 DC-link 전압과 PWM 작동 상태에서의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 4(a)는 제안된 컨버터의 결과이다. 한편, 그림 4(b)는 똑같이 턴온, 턴오프되는 각도에서의 결과를 나타낸다.



(a) Proposed converter with 100V boosting voltage



(b) Asymmetric converter

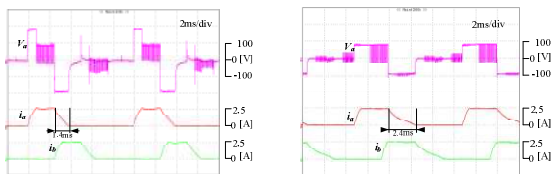
그림 5 싱글 펄스 제어 모드에서의 결과 비교
Figure 5. Compared results in single pulse control mode

시뮬레이션 결과에서 동일한 지점에서 턴-온과 턴-오프조건에서 제안된 컨버터의 경우 여자 시 높은 전압을 인가함으로써 비대칭 컨버터에 비해 빠른 전류의 확립이 가능함을 확인할 수 있었으며, 감자 시에도 높은 감자 전압을 통해 빠른 감자가 이루어짐을 확인하였다. 이는 제안된 컨버터가 비대칭컨버터에 비해 여자 시 적은 선행각을 통해서도 충분한 여자전류를 확립시킬 수 있음을 의미하기 때문에 선행각 구간에서 발생하는 손실을 감소시킬 수 있음을 의미한다. 이와 함께 전류회수가 빠르므로 인덕턴스의 하강구간 즉 부토크 발생구간으로 전류가 늘어지지 않으므로 부토크를 감소시킬 수 있다. 따라서 제안된 컨버터의 경우 모든 속도구간에서 비대칭 컨버터에 비해 토크 발생구간을 효율적으로 사용함으로써 토크특성을 개선할 수 있음을 알 수 있다.

3.2. 실험결과

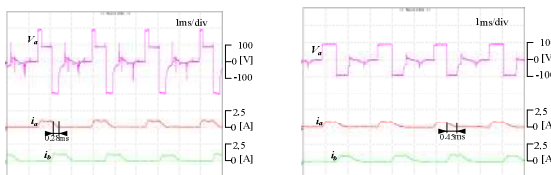
시뮬레이션 결과를 바탕으로 4상 8/6 SRM을 대상으로 제안된 컨버터와 비대칭컨버터의 동작 특성에 대한 실험을 수행하였다. 그림 6은 1,000[rpm] 운전 시 상전압과 상전류를 나타내고 있다. 제안된 컨버터의 경우 비대칭 컨버터에 비해 빠른 여자와 감자가 수행됨을 확인할 수 있으며 그림 7에서와 같이 속도가 증가한 상황에서도 동일한 결과를 보임을 알 수 있다.

그림 8은 제안된 컨버터와 비대칭컨버터에서 속도변동에 따른 응답특성을 비교한 결과를 나타내고 있다. 1,000[rpm] 운전 중 속도지령을 2000[rpm]으로 변경하여 실험을 수행하였으며, 실험결과 비대칭컨버터의 경우 전류의 확립이 원활하게 이루어지지 않아 충분한 토크를 발생시킬 수 없었다. 이에 따라 제안된 컨버터가 비대칭 컨버터에 비해 높은 속도응답특성을 가짐을 확인할 수 있었다.



(a) Proposed converter (b) Asymmetric converter
그림 6 PWM 모드에서의 결과 비교

Figure 6. Compared results in PWM mode

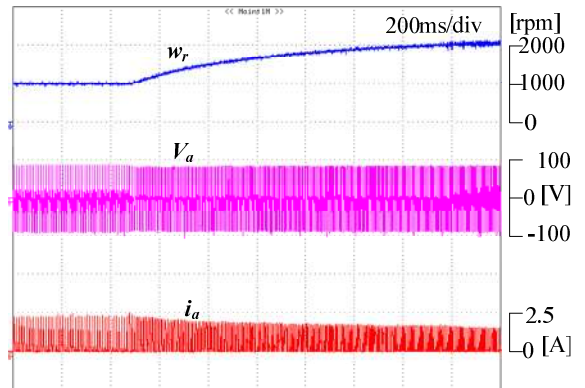


(a) Proposed converter (b) Asymmetric converter
그림 7 싱글 펄스 모드에서의 결과 비교

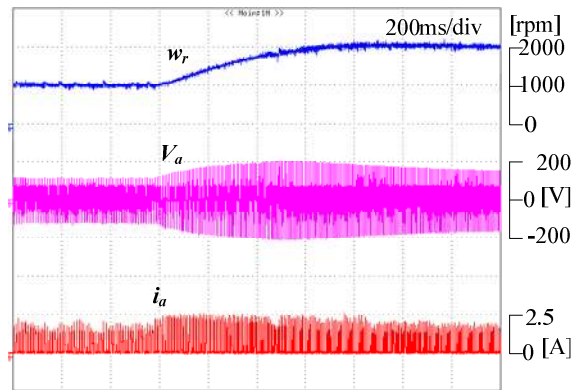
Figure 7. Compared results in single pulse mode

3. 결론

본 논문에서는 SRM의 높은 여자전압과 높은 감자전압의 인가를 위한 새로운 4상 SRM의 부스트 컨버터를 제안하였다. 제안된 컨버터는 기존 부스트 컨버터에 비해 높은 전압제어 특성과 적은 스위칭 소자를 사용한다는 장점을 가지고 있다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 일반적인 비대칭 컨버터와 제안된 컨버터의 동작특성을 비교함으로써 효율성을 검증하였다.



(a) Asymmetric converter



(b) Proposed converter

그림 8 속도 절차 시의 결과 비교

Figure 8. Compared results when speed steps

본 논문은 지식경제부 지원에 의하여 기초전력연구원 (과제번호 : R-2005-7-067) 주관으로 수행된 과제임

참고 문헌

- [1] R. Krishnan, Switched Reluctance Motor Drives, Boca Raton, CRC Press, 2001.
- [2] Z. Nie and A. Emadi, "Integrated converters for switched reluctance motor drives," in Proc. IEEE IPEMC Conf., vol. 2, 2004, pp. 487-490.
- [3] J. D. Lewis, H. R. Bolton, and N. W. Phillips, "Performance enhancement of single and two phase SR drives using a capacitor boost circuit," in Conf. Proc. EPE'95, Sevilla, Spain, Sept. 1995, vol. 3, pp. 229-232.
- [4] Y. G. Dessouky, B. W. Williams and J. E. Fletcher, "A novel power converter with voltage-boosting capacitors for a four-phase SRM drive," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 45, pp. 815-823, October 1998.
- [5] K. I. Hwu and C. M. Liaw, "DC-link voltage boosting and switching control for switched reluctance motor drives," IEE Proc. Electric Power Applications, vol. 147, pp. 337-344, 2000.
- [6] Vukosavic, S. and Stefanovic, V.R., "SRM inverter topologies: a comparative evaluation," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 27, no. 6, pp. 1034-1047, Nov.-Dec. 1991.